

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
Setor de Ciências da Terra  
Departamento de Geologia  
**Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada**

LEVANTAMENTO GEOFÍSICO

## **SÍTIO CONTROLADO DE GEOFÍSICA RASA DA UFPR**

Relatório final do levantamento e processamento de  
dados magnéticos terrestres

Autores: Alessandra de Barros e Silva Bongioio

Luizemara Szameitat

Rafael Espíndola Canata

Rodoilton Stevanato

Henrique Garcia Pereira

Francesco Antonelli

2021

## Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	4
1.1	Local da aquisição magnetométrica .....	4
1.2	Motivação do estudo .....	4
1.3	Caraterísticas gerais do terreno .....	6
1.4	Alvos de objetos metálicos .....	7
2.	AQUISIÇÃO DE DADOS.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.1	Características do levantamento .....	8
2.2	Planejamento e Mobilização.....	9
2.3	Equipamentos utilizados e compilação de dados.....	10
3.	Base científica .....	11
3.1	Magnetometria .....	11
3.2	Magnetômetro de precessão.....	11
3.3	Variação Diurna do campo magnético.....	12
3.4	Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF).....	12
4.	PROCESSAMENTO.....	12
4.1	Remoção da Variação Magnética Diurna.....	12
4.2	Remoção do IGRF .....	13
4.3	Nivelamento dos dados .....	13
5.	TRATAMENTO DE DADOS .....	16
5.1	Redução ao Polo.....	16
5.2	Amplitude do Sinal Analítico.....	16
6.	PRODUTOS .....	17
6.1	Descrição de arquivos .....	17
6.2	Resultado do filtro RTP .....	18
6.3	Resultado do filtro ASA .....	19
	REFERÊNCIAS .....	21

## Lista de Figuras

Figura 1 – Localização do Sítio Controlado de Geofísica Rasa da UFPR (SCGR-UFPR) em relação ao LPGA-UFPR, e mapa com a relação dos alvos presentes. ....	6
Figura 2 – Fotos e interpretação das camadas de solo reconhecidas (FONTE: Canata, 2019).....	7
Figura 3 – Localização dos alvos metálicos em mapa e fotos dos materiais....	7
Figura 4 – Linhas de aquisição magnetométrica. ....	9
Figura 5 – Detalhes do levantamento e magnetômetros utilizados. ....	10
Figura 6 – Exemplo da variação diurna do campo magnético monitorado pelo magnetômetro base em 23/10/2019. O eixo x mostra os horários das medidas e o eixo y as leituras obtidas em nT.....	13
Figura 7 – Nivelamento – exemplo da janela de trabalho.....	14
Figura 8 – Mapas do dado magnético pré-nivelamento e pós-nivelamento e correção do IGRF.....	15
Figura 9 – Janela de parâmetros para a redução ao polo (RTP), módulo Magmap do Oasis Montaj™.....	18
Figura 10 – Mapas dos filtros de redução ao polo (RTP) e amplitude do sinal analítico (ASA).....	20

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Posição dos alvos metálicos. Coordenadas UTM 22S (Datum: Sirgas 2000).	8
Tabela 2 – Parâmetros da aquisição .....	8
Tabela 3 - Equipamentos utilizados durante a aquisição.....	10

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Local da aquisição magnetométrica

O Sítio Controlado de Geofísica Rasa, de responsabilidade do Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA), está localizado no Campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR) (Figura 1), na cidade de Curitiba (PR).

O conjunto de dados disponibilizados neste trabalho estão consolidados em 34 linhas de produção e 9 linhas de controle. As linhas de produção foram dispostas de forma a interceptar os alvos enterrados do sítio controlado de geofísica rasa (Figura 1). A coordenação do trabalho de campo esteve sob responsabilidade de:

- Rodoilton Stevanato – Geólogo pesquisador do LPGA;
- Rafael Canata – Geólogo, idealizador do sítio controlado;
- Alessandra de Barros e Silva Bongioiolo – Professora do Departamento de Geologia da UFPR, coordenadora do LPGA e responsável pelo sítio controlado.

## 1.2 Motivação do estudo

Em diversos locais do mundo são construídos sítios controlados com o intuito de capacitar profissionais em áreas específicas, visto que a construção de campos teste onde são enterrados materiais de geometria, dimensões e propriedades físicas conhecidas auxilia na redução de ambiguidades nas interpretações geofísicas (Luiz J.G. *et al.* 2007). O uso de sítios controlados no Brasil e internacionalmente já foi motivo de diversas pesquisas (e. g. Porsani, 2002; Buck, 2003; Pye, 2004; Rodrigues, 2004; Ruffel, 2005; Rodrigues, 2006; Porsani 2006; Borges, 2007; Luiz J.G. *et al.*, 2007; Blum, 2007; Lourenço, 2009; Blum e Russo, 2012; Pringle *et al.*, 2012; Alves *et al.*, 2013; Buso, 2016; Pringle *et al.*, 2015; Cavalcanti, 2018). Por sua vez, o LPGA/UFPR vem desenvolvendo nos últimos anos pesquisas relacionadas a área forense e arqueologia (Canata *et al.*, 2019; Bongioiolo 2019; Canata, 2020; Canata *et al.*, 2020).

O Sítio Controlado de Geofísica Forense rasa da UFPR (SCGF-UFPR), construído em 2016 e ampliado em 2019 onde os alvos instalados estão relacionados com distintas áreas: Forense, Arqueologia e Paleontologia (Canata *et al.*, 2020). Ao todo são 29 itens enterrados. Os objetos instalados no sítio controlado têm o intuito

de serem alvos conhecidos para estudos metodológicos geofísicos (GPR, magnetometria, gravimetria e eletrorresistividade).

Este trabalho de campo consta com o primeiro levantamento magnetométrico no sítio controlado, e traz a oportunidade do desenvolvimento de técnicas de interpretação e modelagem com alvos conhecidos. Com o uso do método magnético, pretende-se avaliar respostas geofísicas dos objetos. Estes estudos poderão auxiliar no desenvolvimento do uso do dado magnetométrico em investigações forenses e ambientais, por exemplo, de armas enterradas e tambores de aço com contaminantes (e.g., trabalhos realizados no Sítio Controlado de Geofísica rasa, SCGR, do IAG/USP; De Paula *et al.* 2007).

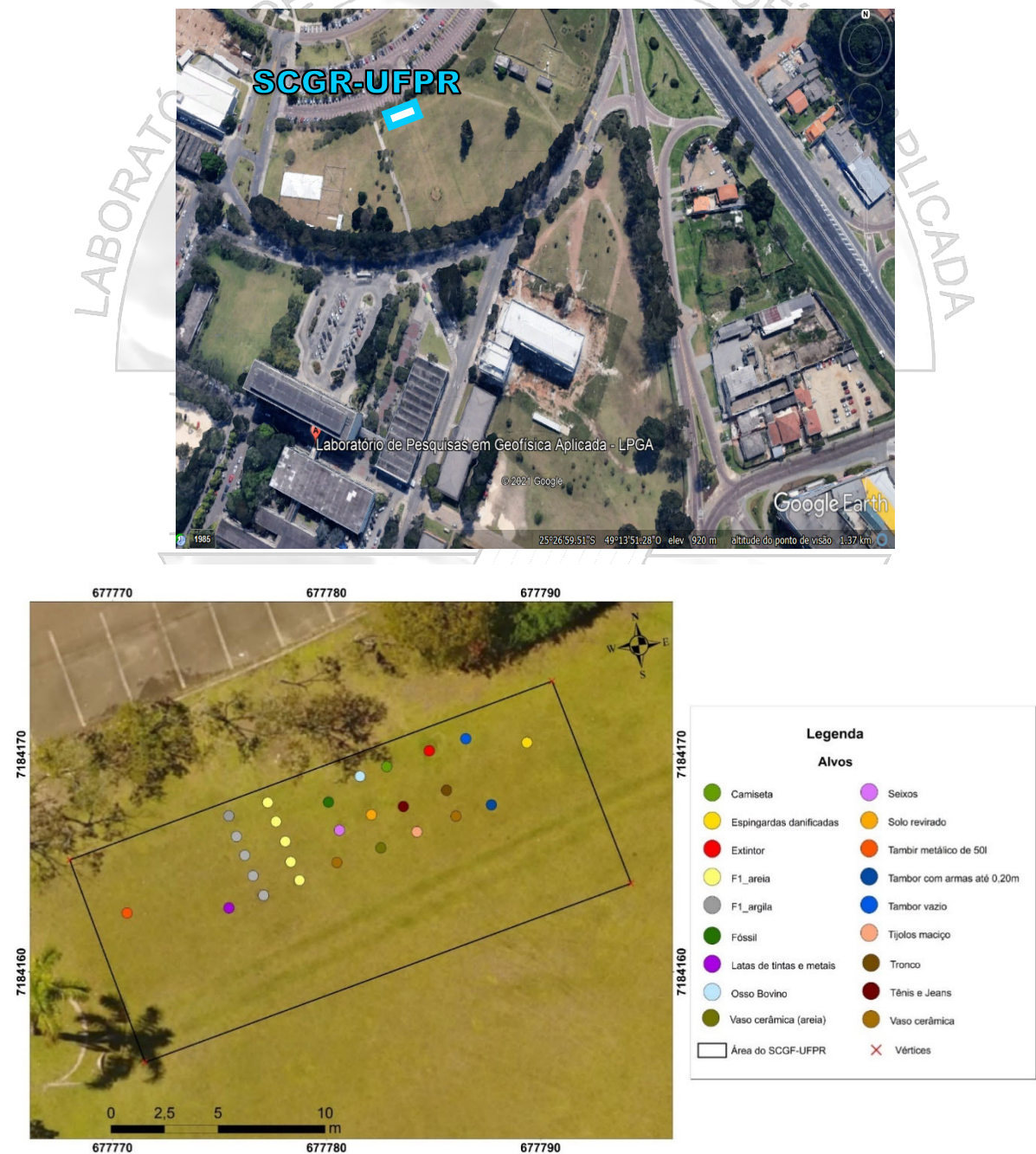


Figura 1 – Localização do SCGR-UFPR em relação ao LPGA-UFPR, e mapa com a relação dos alvos presentes.

### 1.3 Características gerais do terreno

A respeito da contextualização geológica o sítio controlado está inserido na Formação Guabirotuba, designada primeiramente por Bigarella *et al.* (1961), a qual encontra-se sobreposta ao embasamento ou Complexo Atuba (migmatitos e gnaisses) e está inserida na Bacia de Curitiba. Segundo estes autores a formação é caracterizada por distintos litotipos como argilitos, os arcósios, os depósitos conglomeráticos e os depósitos carbonáticos (caliche). Felipe (2011) atribui aos sedimentos uma idade de deposição compreendida no intervalo de 23 a 1,8 milhões de anos que estão associados aos períodos Paleógeno – Quaternário.

Os argilitos ou sedimentos argilosos que predominam na Formação Guabirotuba possuem tonalidades diferentes em decorrência do processo de intemperismo: as colorações esverdeadas, cinza e marrom estão associadas ao baixo intemperismo, em contrapartida, quando há existência de um forte intemperismo pode ocorrer o processo de laterização e contribuir para uma coloração avermelhada a amarelada (Felipe 2011).

O solo característico do local do sítio está intrinsecamente relacionado a Formação Guabirotuba, ou seja, são solos argilosos. Felipe (2011) descreve um perfil típico de alteração do solo característico desta Formação. Felipe (2011) classifica distintos materiais: (i) solo transportado com linha de seixos; (ii) solo residual maduro com intercalação de arcósios; (iii) solo residual jovem; (iv) argilas alteradas; (v) conglomerado e saprólito gnaiss-migmatito. As fotos da Figura 2 representam as camadas de solo identificadas quando da instalação dos alvos (Canata *et al.*, 2019)



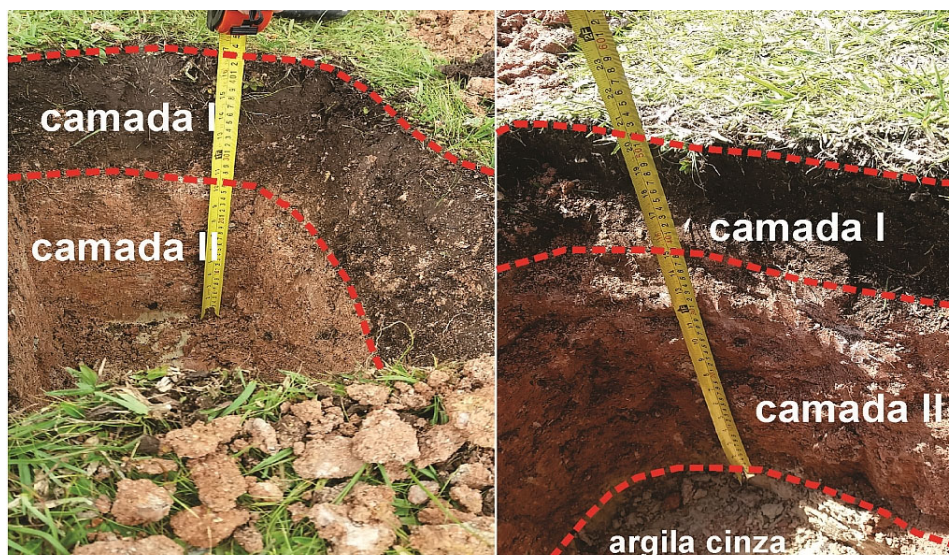


Figura 2 – Fotos e interpretação das camadas de solo reconhecidas (FONTE: Canata *et al.*, 2019).

## 1.4 Alvos de objetos metálicos

Na Figura 3 estão representados os alvos relevantes para o levantamento magnetométrico, com as posições e os tipos de materiais enterrados nos sítios de teste. Na Tabela 1, estão as posições dos alvos.

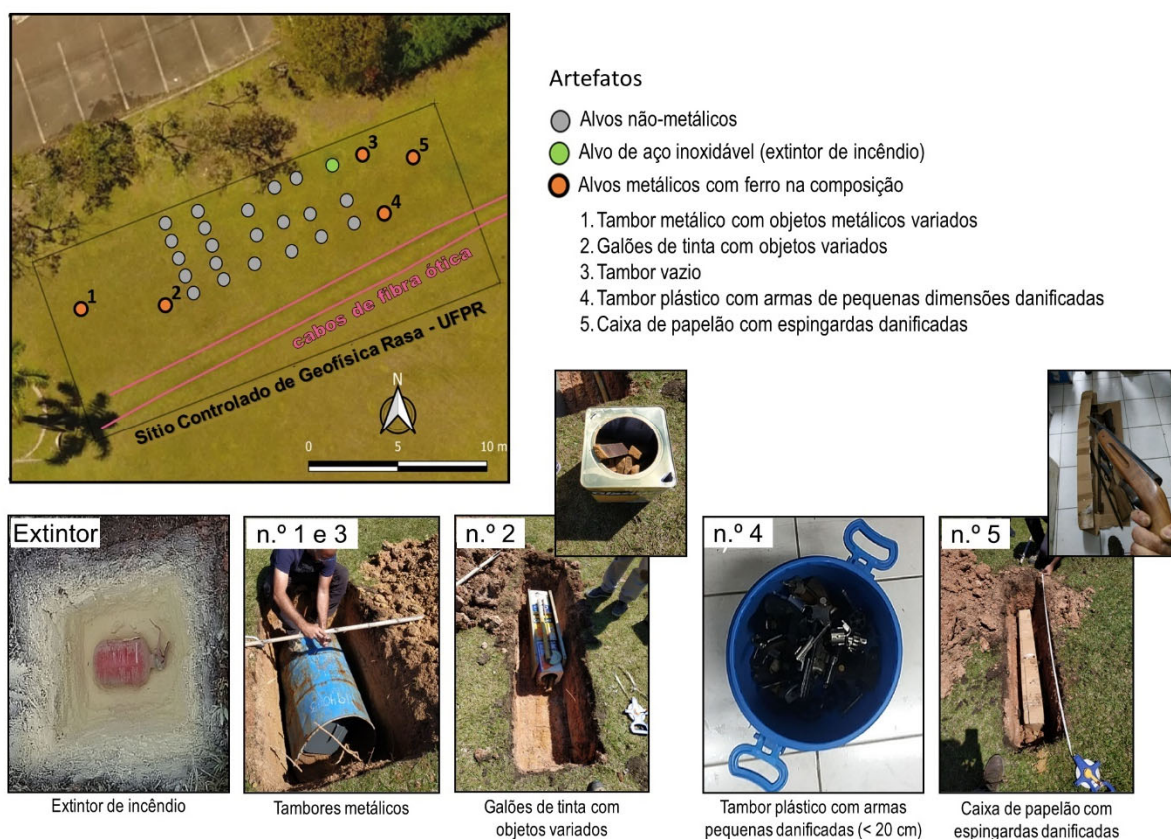


Figura 3 – Localização dos alvos metálicos em mapa e fotos dos materiais.

Tabela 1 – Posição dos alvos metálicos. Coordenadas UTM 22S (Datum: Sirgas 2000).

Artefatos metálicos	Profundidade do topo do alvo (m)	X	Y
Extintor	0,32	677784,8028	7184170,1557
Tambor com metálicos (#1)	0,35	677770,6808	7184162,7038
Galões de tinta (#2) + amostra de mão (gabro), chapa metálica e ripas de aglomerado	0,30	677775,4431	7184162,9340
Tambor metálico vazio (#3)	0,30	677786,5110	7184170,7109
Tambor plástico com armas danificadas < 0,20m (#4)	0,30	677787,7069	7184167,6735
Caixa de papelão com espingardas danificadas (#5)	0,37	677789,3677	7184170,5372

## 2. AQUISIÇÃO DE DADOS

### 2.1 Características do levantamento

As medidas de intensidade do campo magnético foram tomadas com espaçamentos de 0,5 e 0,25 m, com adensamento da malha sobre os alvos enterrados, totalizando 659 estações e 553,39 m de perfis. Em cada estação foram registradas 2 leituras de modo a diluir eventuais desvios abruptos pela repetição. As medições foram anotadas manualmente e também armazenadas na memória do próprio equipamento. Ao término da aquisição, os arquivos contendo os dados da produção e da variação diurna foram transferidos para o computador instalado no LPGA-UFPR.

Os parâmetros utilizados em campo para a aquisição estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de aquisição

Direção da linha de produção (survey line):	N20°W
Direção das linhas de controle (tie line)	N70°E
Espaçamento das linhas de aquisição	1 m a 0,5 m
Espaçamento das linhas de controle	1 m
Intervalo de medições magnéticas	1 m
Número de medidas por ponto para averiguação	2
Erro máximo de leitura considerado em cada ponto	10 nT
Altura do sensor	2,0 m
Taxa de leitura estabelecida para o magnetômetro base	0.5 Htz (1 a cada 60 segundos)



## 2.2 Planejamento e Mobilização

O levantamento foi planejado de forma que grande parte da equipe do LPGA pudesse acompanhar e participar da aquisição. Estiveram presentes na aquisição, além dos autores deste relatório, alunos da disciplina de Geofísica Aplicada do curso de geologia e do capítulo estudantil Geofísica Paraná (SEG/UFPR). O ajuste dos equipamentos foi coordenado pelo Msc. Rodoilton Stevanato, geólogo pesquisador do LPGA.

As linhas de produção foram programadas de acordo com as dimensões e posicionamento dos alvos magnéticos conhecidos. Por isso, a disposição das linhas foi determinada entre 0,5 m e 1 m. No momento da aquisição, foi verificada a necessidade do adensamento sobre os alvos (espaçamento de 0,5 m) para melhor caracterização das anomalias. Os perfis SW-NE foram definidos com aproximadamente 24 m de comprimento, e os de direção NW-SE com cerca de 10 m.

A programação das linhas foi realizada pela equipe do LPGA. A Figura 4 traz a disposição das linhas levantadas e representação dos pontos.

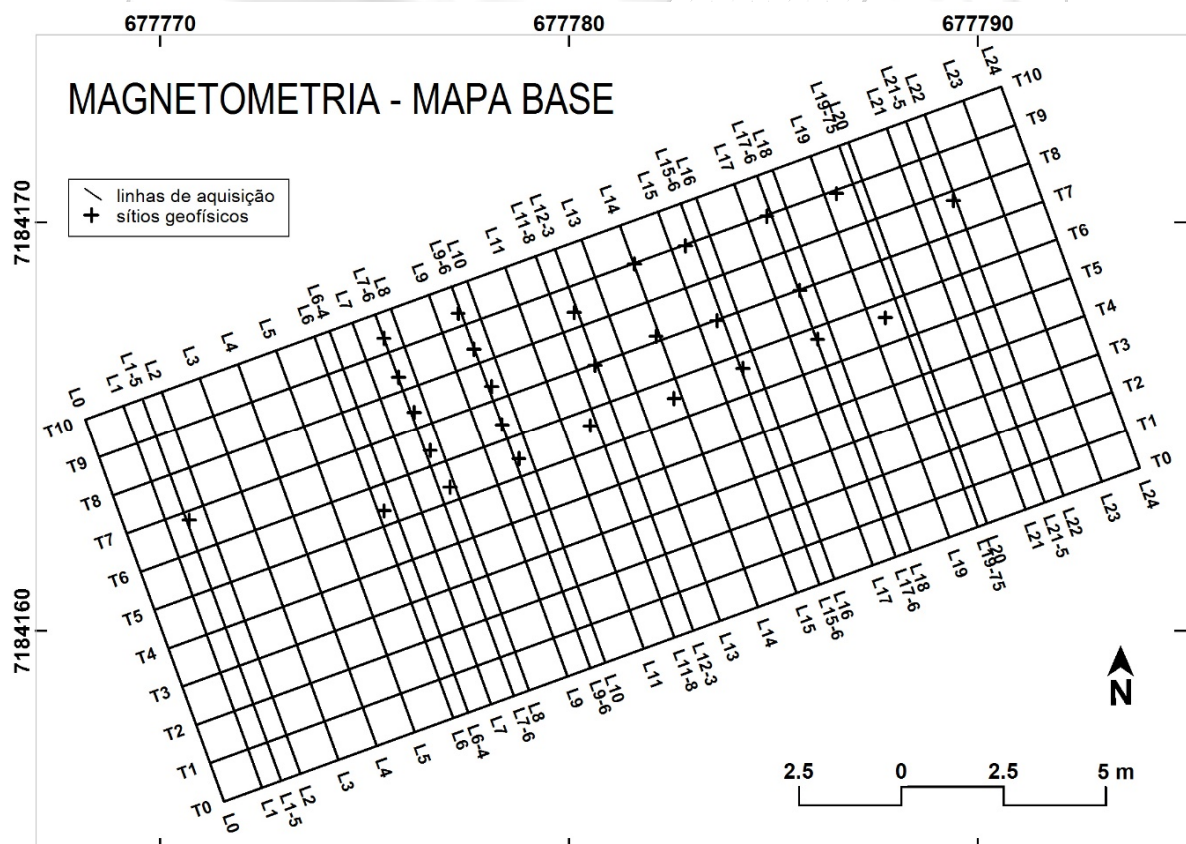


Figura 4 – Mapa das linhas de aquisição magnetométrica.

## 2.3 Equipamentos utilizados e compilação de dados

A Tabela 3 apresenta um resumo das principais características dos equipamentos utilizados na aquisição.

Tabela 3 - Equipamentos utilizados durante a aquisição

Magnetômetro móvel	(1) GemSystems GSM-19T Tipo: Precessão de prótons Resolução: 0,01 nT Sensibilidade: <0,1 nT Precisão absoluta: 0,2 nT
Magnetômetro base	(1) Scintrex ENVI MAG Tipo: Precessão de prótons Resolução: 0,2 nT Sensibilidade: 0,1 nT Precisão Absoluta: $\pm 1$ nT
GPS	Garmin Vista
Outros	Fita métrica, corda, planilha, caneta;

A metodologia de aquisição adotada baseou-se no uso de magnetômetros do tipo precessão de prótons. O magnetômetro móvel utilizado foi o modelo GSM-19T da GEM SYSTEM para a leitura das estações, e foi operado por equipes de duas pessoas. Já como magnetômetro de base (fixo), foi utilizado o modelo ENVI MAG da Scintrex, para medição da variação magnética diurna, com leituras a cada minuto.

O modelo GSM-19T apresenta maior resolução (0,01 nT) e precisão absoluta (0,2 nT) de medidas em relação ao ENVI MAG (0,2 nT e 1 nT, respectivamente). Em decorrência da elevada sensibilidade dos equipamentos, os operadores evitaram ao máximo a permanência em campo de objetos com quantidades consideráveis de ferro e equipamentos eletrônicos, como recomendado por Telford *et al.* (1990) e Kearey *et al.*, (2002).



Figura 5 – Detalhes do levantamento e magnetômetros utilizados.

Ao término do trabalho, os dados registrados no equipamento foram transferidos para os computadores do LPGA pelo Geólogo Rodoilton Stevanato e pelo Geofísico Henrique Pereira. As correções de variação diurna, IGRF e primeiro nivelamento foram realizadas no dia seguinte ao levantamento Geólogo Rodoilton Stevanato. O nivelamento manual final foi realizado três meses depois, pela Geóloga Luizemara Szameitat.

### 3. Base Científica

#### 3.1 Magnetometria

A magnetometria é um método geofísico fundamentado nas propriedades magnéticas do meio para fornecer informações principalmente da subsuperfície. Este é um método passivo que detecta as variações naturais do campo magnético da Terra, controladas principalmente pela susceptibilidade magnética das rochas (Telford *et al.*, 1990).

A interpretação magnética é mais complexa do que a gravimétrica, principalmente pela natureza dipolar do campo magnético, em contraste ao campo gravimétrico monopolar, além da localização geográfica das fontes, da direção de aquisição dos dados e da dependência da magnetização (induzida e remanente). Por este motivo, o estudo do comportamento do sinal magnético tem se tornado de extrema importância em termos de cartografia de estruturas e contatos geológicos, estimativas de forma e profundidade das fontes e elaboração de modelos geofísicos quantitativos (Kearey *et al.*, 2002).

#### 3.2 Magnetômetro de precessão

O princípio de funcionamento desse tipo de magnetômetro é baseado na capacidade que os núcleos dos átomos de hidrogênio têm em mudar seu eixo de rotação (spin) quando um campo externo é aplicado (Lowrie, 2007). Com a remoção do campo externo, os spins tendem a retornar ao seu movimento rotacional natural. O magnetômetro mede a frequência de precessão do núcleo de hidrogênio sobre a direção do vetor do campo magnético terrestre, onde a frequência é proporcional à intensidade do campo local. A frequência de precessão  $f$  pode ser definida como:

$$f = \gamma B / 2\pi$$

(Equação 1)

onde  $B$  é a intensidade total do campo,  $\gamma$  é a razão girométrica do próton do hidrogênio (42,57 MHz/T). Assim, o campo magnético medido  $B$  é dado por:

$$B = 2\pi f / \gamma$$

(Equação 2)

### 3.3 Variação Diurna do campo magnético

A variação diurna é um fenômeno natural do campo magnético terrestre, dado pela ionização da atmosfera por fótons da luz solar (ionosfera). A movimentação dos íons e elétrons atmosféricos dada pelos ventos, produzem correntes elétricas e consequentemente campo magnético. A ligação com a incidência solar pode ser observada pelo perfil de variação, que apresenta, por exemplo, um pico do sinal em nT entorno do meio-dia. Esta variação é observada em um mesmo ponto, monitorado ao longo do dia (ou do período do levantamento), ao qual chamamos “estação -base”. A variação ao longo do período é então removida do dado adquirido, pois este sinal não é derivado dos objetos estudados (Kearey *et al.*, 2002).

### 3.4 Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF)

Os valores do campo geomagnético terrestre são calculados utilizando o Campo Geomagnético de Referência Internacional (*International Geomagnetic Reference Field*, IGRF) para o ano do levantamento (Thébault *et al.*, 2015). Este modelo é atualizado a cada 5 anos, como resultado de um esforço conjunto internacional de pesquisadores do campo magnético, e o modelo é aprovado pela *International Association of Geomagnetism and Aeronomy* (IAGA). O modelo IGRF fornece os ângulos de inclinação e declinação magnética, e a intensidade do campo. Detalhes e dados dos modelos podem ser obtidos na página oficial <https://geomag.bgs.ac.uk/research/modelling/IGRF.html>.

## 4. PROCESSAMENTO

### 4.1 Remoção da Variação Magnética Diurna

A correção da Variação Magnética Diurna foi realizada por meio da correlação dos dados coletados pelos magnetômetros base e móvel, balizada no horário das aquisições e no *datum* magnético obtido para o centro da área de estudo. Esta correlação foi realizada de maneira automática pelo programa *GEMLink*, da *GEM*



System. O valor do *datum* magnético da área de estudo obtido no site da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) foi de 22.609 nT.

A Figura 6 mostra uma variação diurna típica, com pico máximo próximo ao meio dia (horário de maior incidência solar) seguido de decaimento gradual ao final da tarde.

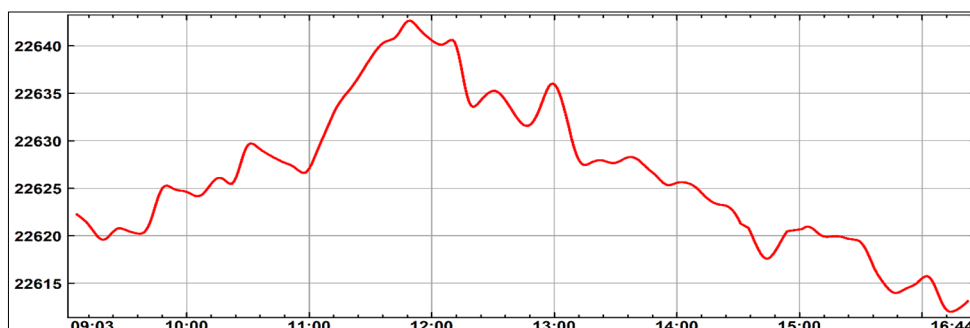


Figura 6 – Exemplo da variação diurna do campo magnético monitorado pelo magnetômetro base em 23/10/2019. O eixo x mostra os horários das medidas e o eixo y as leituras obtidas em nT.

## 4.2 Remoção do IGRF

O efeito do Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF) foi removido através da geração de valores no programa Oasis Montaj<sup>TM</sup>, definidos com base no modelo magnético para o ano de 2015 (modelo disponível à época), e para a altitude assumida segundo dados do Projeto Campus Map da UFPR (Delazari e Ercolin Filho, Fonte: <http://www.campusmap.ufpr.br/map/php/index.php> Acesso em 15/01/2020).

## 4.3 Nivelamento dos dados

O nivelamento foi realizado no programa Oasis Montaj<sup>TM</sup>. Em um primeiro momento, foi realizada uma correção geral de nivelamento automático, com base em uma superfície que segue a tendência geral das linhas de controle, e que resulta em uma distribuição gaussiana dos erros de cruzamento. Em seguida, os dados passaram por um nivelamento de linhas manual, por meio da extensão *kit levelling\_system.omn* do programa supracitado.

O nivelamento consiste em mapear o erro nos cruzamentos das linhas, e utilizar ferramentas de modelagem de tendências para cada linha. As tendências a serem removidas são reconhecidas pela ocorrência sistemática de erros ao longo de uma mesma linha, assim como pela observação das linhas transversais. Em geral, as correções preservam as linhas de controle e modificam as linhas de produção, mas

há exceções. O nivelamento é baseado em uma tabela de interseções gerada automaticamente pelo Oasis Montaj™ (módulo XLEVEL GX). Os valores são salvos em uma tabela isolada, que deve ser importada para o banco de dados da aquisição.

O nivelamento das linhas de controle busca não transformar significativamente as anomalias ao longo destas linhas, e, portanto, as correções costumam ser feitas com polinômios de primeira ordem. Com as linhas de controle niveladas, as linhas de produção passam a ser ajustadas às linhas de controle, de forma a reduzir ao máximo possível as diferenças nos cruzamentos.

O nivelamento das linhas de produção consiste em mapear o erro nos cruzamentos destas com as linhas de controle, e mitigar este erro utilizando ferramentas de modelagem de tendências para cada linha. As tendências a serem removidas são reconhecidas pela ocorrência sistemática de erros ao longo de uma mesma linha, assim como pela observação das linhas transversais. Os erros sistemáticos são observados pela *plotagem* dos dados na janela inferior do banco de dados (Figura 7). O erro buscado mínimo, neste caso, é 10 nT, o que corresponde ao valor assumido pela equipe de aquisição durante as medições. No entanto, ao final de todas as correções, o ajuste ficou limitado a  $\pm 16,8$  nT.

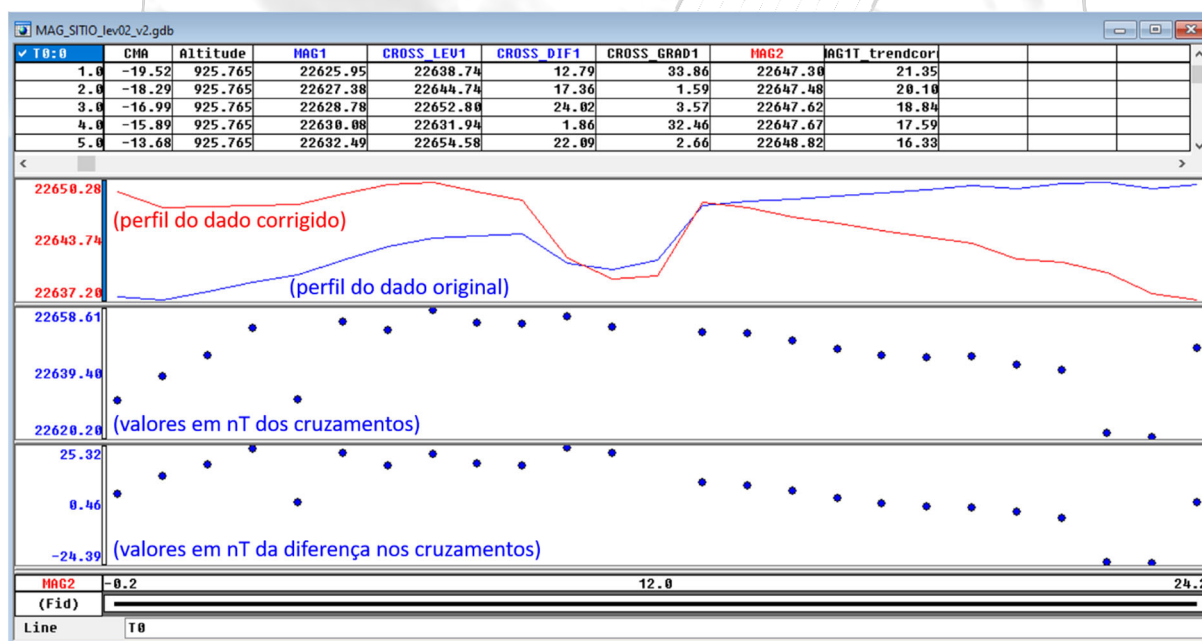


Figura 7 – Nivelamento – exemplo da janela de trabalho.

Um evento aleatório, externo ao controle da equipe, causou a distorção das anomalias em parte das linhas de produção e de uma linha de controle. O evento consistiu na parada temporária de um carro ao lado do sítio de pesquisa o que gerou a perturbação das anomalias. O sítio está sujeito a este tipo de evento, pelo fato de estar ao lado de um estacionamento no Campus Politécnico. Mas a distorção foi

gerada no trecho NW do sítio onde não haviam alvos magnéticos enterrados. Além disso, uma das linhas de Controle na região afetada foi levantada após o incidente, o que possibilitou a estimativa da posição correta das linhas. A correção desta distorção acidental foi feita com a subtração de tendências das linhas de produção, modeladas por *splines*, e a retirada de duas linhas de controle adquiridas na porção NW do polígono. O banco de dados disponibilizado inclui o campo magnético pré-nivelado, preservada a distorção acidental, e o campo anômalo pós-correção.

O dado pré e pós-nivelamento está representado na Figura 8.

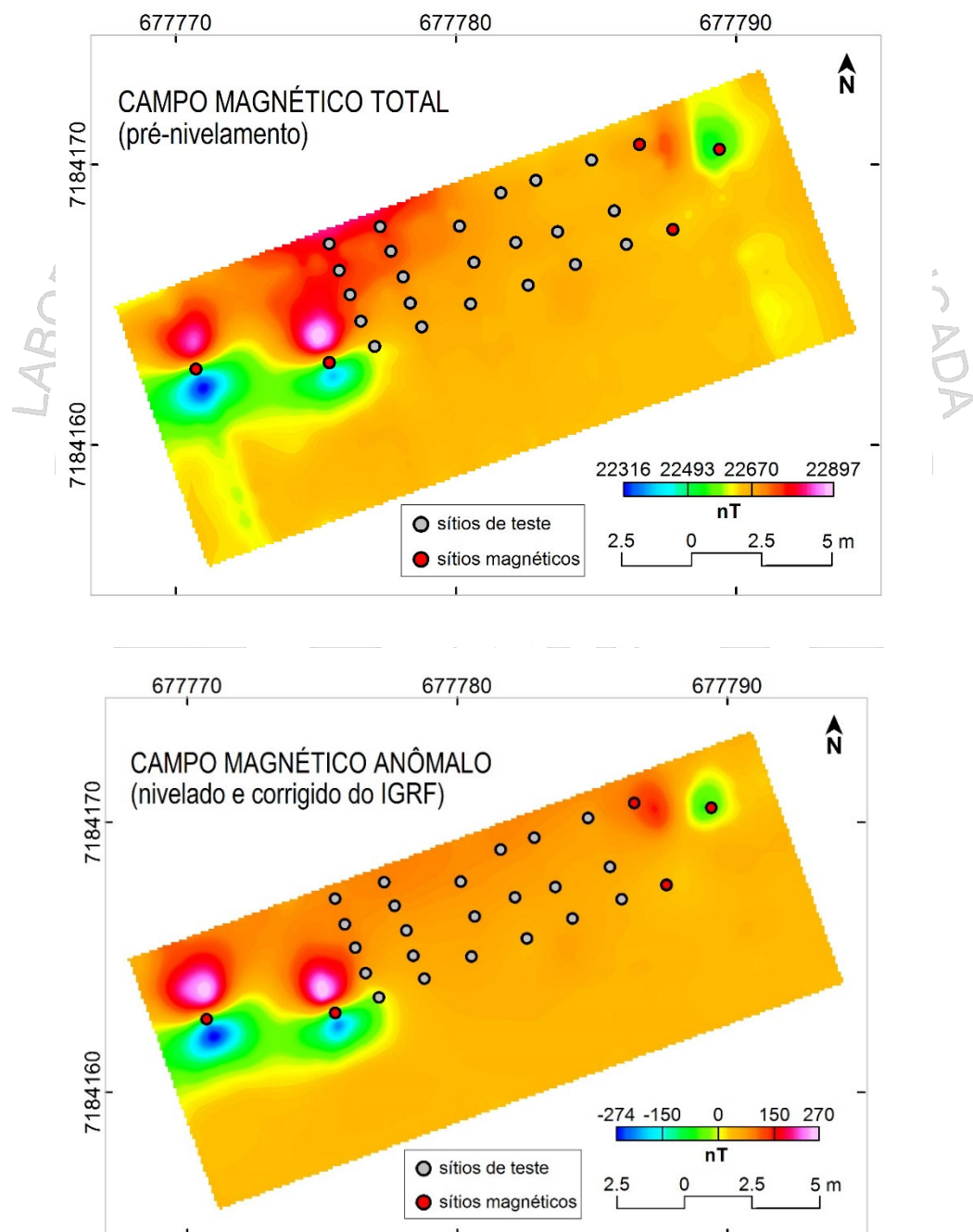


Figura 8 – Mapas do dado magnético pré-nivelamento (painel superior) e pós-nivelamento com a correção do IGRF (painel inferior).

O grid final dos dados magnéticos de campo anômalo (Figura 8) foi gerado a partir da interpolação por mínima curvatura com célula de 0,25 m (correspondente a 1/2 do menor espaçamento entre linhas), e está disponibilizado junto deste documento no repositório científico da UFPR.

## 5. TRATAMENTO DE DADOS

Os dados magnéticos foram corrigidos para mitigar as variações do dado ocasionadas por efeitos magnéticos não desejados (Telford *et al.*, 1990; Luiz e Silva, 1995). Estas transformações são realizadas a partir do campo magnético anômalo (CMA).

### 5.1 Redução ao Polo

O filtro da Redução ao Polo (Baranov, 1957; Baranov e Naudy 1964) foi aplicado sobre o CMA para centralizar as anomalias sobre suas fontes causativas, considerando apenas a magnetização induzida, a partir da seguinte equação (Grant e Dodds, 1972; MacLeod *et al.*, 1993a, 1993b; Li, 2008):

$$RTP(\theta) = \frac{[\sin(I) - \cos(I) \cos(D - \theta)]^2}{[\sin^2(I_a) + \cos^2(I_a) \cos^2(D - \theta)] \cdot [\sin^2(I) + \cos^2(I) \cos^2(D - \theta)]} \quad (\text{Equação 1})$$

onde I é a inclinação, D é a declinação,  $\theta$  é a direção do número de onda e  $I_a$  é a inclinação para correção da amplitude ou pseudo-inclinação, que é o ângulo complementar ao da inclinação verdadeira.

### 5.2 Amplitude do Sinal Analítico

O filtro de Amplitude do sinal analítico (ASA; Nabighian, 1972) foi aplicado sobre o campo magnético total (CMA). A ASA é uma função simétrica em formato de sino, relacionada às derivadas nas direções x, y e z. Seu máximo é situado exatamente sobre o topo de cada contato e sua largura relacionada diretamente com a profundidade do corpo. Tais características são vantajosas na interpretação, especialmente quando a contribuição da magnetização induzida ou remanescente não pode ser distinguida (Nabighian, 1972; Roest *et al.*, 1992; Hsu *et al.*, 1996). O filtro ASA é expresso por:



$$\left[ \left( \frac{\partial M}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial M}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial M}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2}$$

(Equação 2)

onde  $M$  é a anomalia do campo potencial,  $\partial M / \partial z$  é a primeira derivada vertical,  $\partial M / \partial x$  e  $\partial M / \partial y$  são as primeiras derivadas horizontais nas direções  $x$  e  $y$ , respectivamente.

## 6. PRODUTOS

Como resultado do nivelamento e filtragens, temos os mapas CMA (Figura 8), ASA e RTP (Figura 10). Os grids e os dados originais estão disponíveis como arquivos do tipo texto. Nos arquivos (.xyz) as colunas de dados deverão corresponder às coordenadas em  $x$  e  $y$ , e o dado de campo magnético anômalo (CMA). Adicionalmente, o banco de dados magnetométricos está sendo disponibilizado no formato texto separado por vírgulas (.dat), contendo informações sobre o sistema de georreferenciamento, referências bibliográficas adicionais, e a descrição dos canais de dados.

### 6.1 Descrição de arquivos

- a) **boundary.ply** – polígono utilizado como limites dos grids
  - Sistema de coordenadas: SIRGAS 2000 / UTM zone 22S
  - Datum: SIRGAS 2000,6378137,0.0818191910428158,0
  - Projeção: Transverse Mercator,0,-51,0.9996,500000,10000000
  - Unidade: metros
  - Local Datum=SIRGAS 2000 to WGS 84
- b) **rawdata.dat** – banco de dados dos pontos adquiridos
  - Sistema de coordenadas: SIRGAS 2000 / UTM zone 22S
  - Datum: SIRGAS 2000,6378137,0.0818191910428158,0
  - Projeção: Transverse Mercator,0,-51,0.9996,500000,10000000
  - Unidade: metros
  - Local Datum=SIRGAS 2000 to WGS 84
  - Topografia: UFPR CampusMap Project (<https://campusmap.ufpr.br/>; Stamato Delazari et al., 2019).
  - Canais de dados:

Line = nome de linha

x = coordenadas E

y = coordenadas N

UNLEVELED = campo magnético total não nivelado

decl, incl = declinação, inclinação do campo magnético ambiente

IGRF = modelo do campo regional

MAGLEV = CMA pós-nivelamento

CROSS\_LEVEL = valor do CMA na linha de cruzamento

CROSS\_DIFF = diferença do CMA no ponto de cruzamento

COTA\_CAMPUS = topografia UFPR CampusMap

c) **mag.xyz, mag\_asa.xyz, mag\_rtp.xyz** – dados no formato grid (0,25x0,25 m)

- Sistema de coordenadas: SIRGAS 2000 / UTM zone 22S
- Datum: SIRGAS 2000,6378137,0.0818191910428158,0
- Projeção: Transverse Mercator,0,-51,0.9996,500000,10000000
- Unidade: metros
- Local Datum=SIRGAS 2000 to WGS 84

## 6.2 Resultado do filtro RTP

Para a aplicação do filtro RTP foi utilizada a extensão Magmap do programa Oasis Montaj™, onde são requeridos os parâmetros de inclinação e declinação magnéticas, além de um fator de correção para regiões de baixas latitudes. Os valores empregados foram, respectivamente:  $D = -19.8^\circ$  e  $I = -38.2^\circ$  e  $I_a = -51.8^\circ$  (Figura 9).

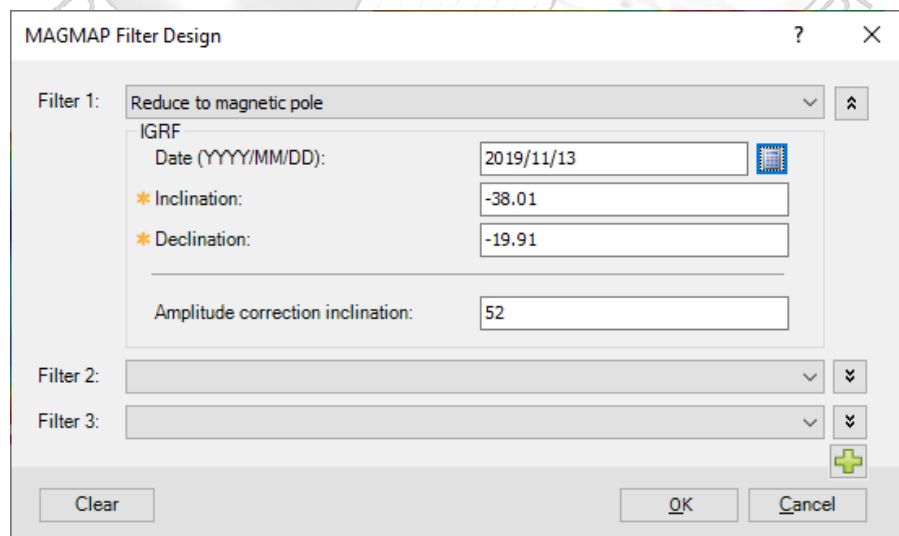


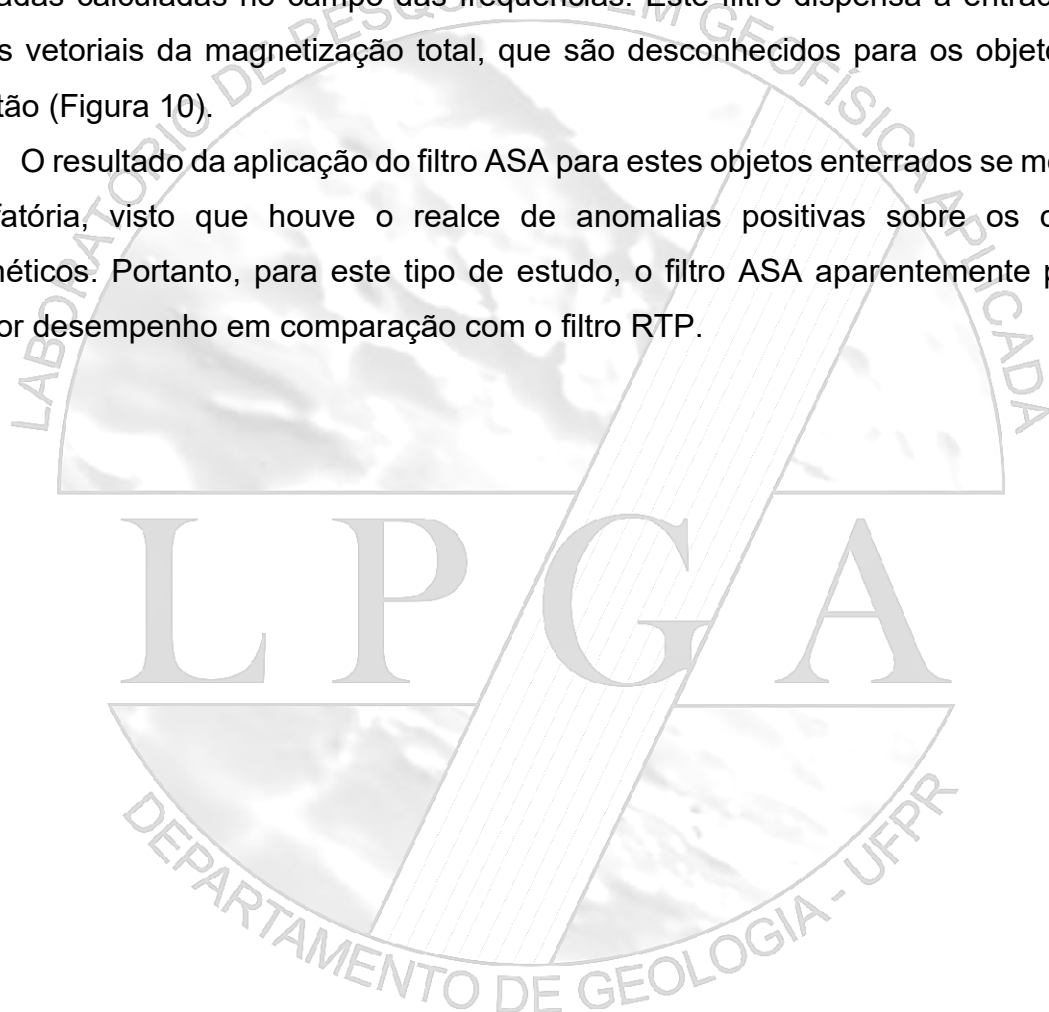
Figura 9 – Janela de parâmetros para a redução ao polo (RTP), módulo Magmap do Oasis Montaj™.

Para a aplicação nos objetos enterrados neste sítio, foi observado que o filtro RTP não apresentou bom desempenho na delimitação de objetos metálicos. Isto pode ser interpretado como sendo um efeito da magnetização dos materiais enterrados, a qual não deve apresentar uma orientação vetorial total paralela ao campo magnético terrestre no local (Figura 10).

### 6.3 Resultado do filtro ASA

O filtro ASA também foi aplicado através do programa Oasis Montaj™, com as derivadas calculadas no campo das frequências. Este filtro dispensa a entrada dos dados vetoriais da magnetização total, que são desconhecidos para os objetos em questão (Figura 10).

O resultado da aplicação do filtro ASA para estes objetos enterrados se mostrou satisfatória, visto que houve o realce de anomalias positivas sobre os corpos magnéticos. Portanto, para este tipo de estudo, o filtro ASA aparentemente possui melhor desempenho em comparação com o filtro RTP.



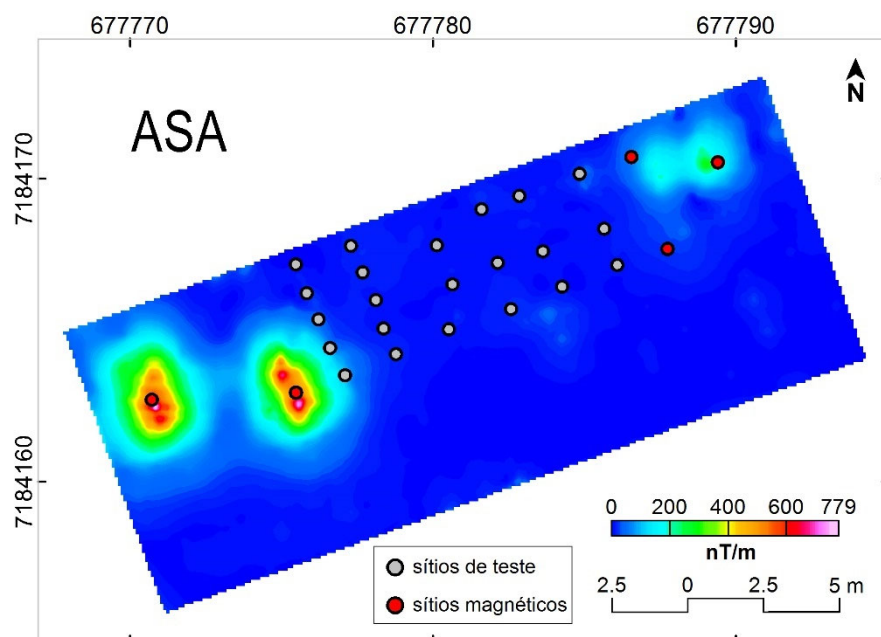
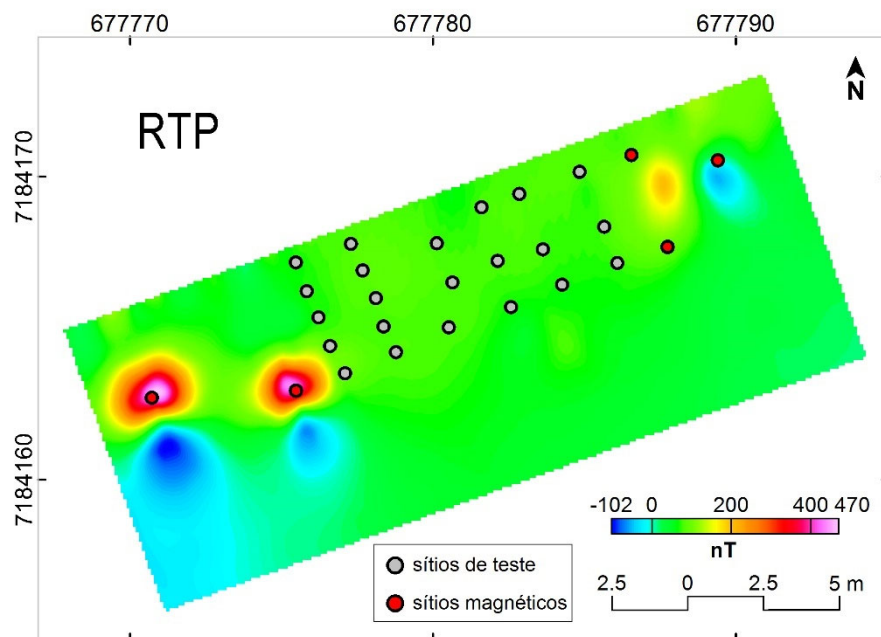


Figura 10 – Mapas dos filtros de redução ao polo - RTP (painel superior) e amplitude do sinal analítico - ASA (painel inferior).



## REFERÊNCIAS

- ALVES L.K., BORGES W.R. & BLUM M.L.B. Mapeamento de alvos forenses com GPR 3D. 2013. In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 13. Rio de Janeiro. Proceedings... Rio de Janeiro, Brazil: SBGf, 2013. CD-ROM.
- BARANOV, V. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies. 1957. **Geophysics**, v.22, n.2, p.359-383. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1438369>.
- BARANOV, V.; NAUDY, H. Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. 1964. **Geophysics**, v.29, n.1, p.67-79. doi: <http://dx.doi.org/10.1190/1.1439334>.
- BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R.; AB`SABER, A.N. 1961. Origem e ambiente de deposição da Bacia de Curitiba. Boletim Paranaense de Geografia, UFPR, Curitiba, n.4/5, p.71-81.
- BLUM M.L.B. Uso da Geofísica em Perícias de Crimes Ambientais - Uma introdução. 2007. Revista Perícia Federal. Associação Nacional dos Peritos Criminais Federais.
- BLUM M.L.B., RUSSO D. SITICRIM – Brazilian Test Site for Forensic Geophysical Research. 2012. In: European Academy of Forensic Science Conference. The Hague, Netherlands: EAFS, poster.
- BONGIOLO A.B.S., CANATA R.E. O Sítio Controlado de Geofísica Forense Arquelógica e Paleontológica do LPGA/UFPR: Instalação e Resultados no Uso do Radar de Penetração de Solo (GPR). 2019. In: PROGEO – Congresso Brasileiro de Profissionais das Geociências, São Paulo – SP. Anais do Congresso Brasileiro de Profissionais das Geociências. São Paulo – SP: Federação Brasileira de Geologia – FEBRAGEO, v. 1. p. 15.
- BORGES W.R. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. 2007. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Departamento de Geofísica. Universidade de São Paulo. 264p.
- BUCK S.C. Searching for graves using geophysical technology: field tests with ground penetrating radar, magnetometry, and electrical resistivity. 2003. Journal of Forensic Sciences 48, 5 –11.
- BUSO A.S.O, BLUM M.L.B, BORGES W.R. Imageamento GPR 3D de alvos forenses na área sítio controlado de criminalística (SITICRIM). 2016. In: VII Simpósio Brasileiro de Geofísica. Ouro Preto. Anais... Ouro Preto, CD-ROM.
- CANATA R.E., FERREIRA F.J.F., BORGES W.R., SALVADOR F.A.S., BONGIOLO A.B.S. GPR 3D aplicado no Sítio Controlado de Geofísica Forense da UFPR. 2019. 16 th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil.
- CANATA R.E., FERREIRA F.J.F., BORGES W.R., SALVADOR F.A.S. Analysis of 2D and 3D GPR responses in the Federal University of Paraná Forensic Geophysics Controlled Site – A Case Study. 2020. Brazilian Journal of Geophysics.38(2):X-Y
- CANATA, R.E. Diagnóstico de parâmetros geofísicos usados em geociências forenses. Programa de Pós-Graduação em Geologia (Tese de doutorado). 2020. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 176p.
- CAVALCANTI M.M., ROCHA M.P., BLUM M.L.B, BORGES W.R. The forensic geophysical controlled research site of the University of Brasilia, Brazil: Results from methods GPR and electrical resistivity tomography. 2018. Forensic Science International. 293: 101e1 – 101e21

DELAZARI L.S., ERCOLIN FILHO L. 2018. Projeto UFPR CampusMap. Curitiba: UFPR, CEPAG – Centro de Pesquisas Aplicadas em Geoinformação. Project in Progress. Available on: <[www.campusmap.ufpr.br](http://www.campusmap.ufpr.br)>. Access on: January 15, 2020.

DE PAULA G.B., MENDONÇA C.A., HODO F.Y. Levantamentos magnéticos para estudos de geofísica rasa: Uma experiência de campo no Sítio Controlado de Geofísica Rasa (SCGR) do IAG/USP. 2007. 10th International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil.

FELIPE, R.S. Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba Erosão-movimentos Gravitacionais de Massa. 2011. Curitiba: MINEROPAR- Serviço Geológico do Paraná.

GRANT, F.S.; DODDS, J. **MAGMAP FFT Processing System Development Notes**. 1972. Paterson Grant and Watson Limited.

HSU, S.K.; SIBUET, J.C.; SHYU, C.T. High-resolution detection of geological boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytical signal technique. 1996. **Geophysics**. v.61, n.2, p.373-386. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1443966>.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**. 2002. Oxford: Blackwell Science Ltd.

LOURENÇO V.L. Utilização do Radar da penetração nos solos (GPR) na detecção de estruturas no âmbito da Ciências Forenses. 2009. Trabalho de conclusão de curso (Centro de Geofísica) – Universidade de Évora, Portugal, 44 f.

LI, X. Magnetic reduction-to-the-pole at low latitudes: Observations and considerations. 2008. **The Leading Edge**, v.27, n.8, p.990–1002. doi: <http://dx.doi.org/10.1190/1.2967550>.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. 2007. Cambridge: Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807107>.

LUIZ J.G., FONSECA M.R.N., MOREIRA O.M.A., FURTADO P.C. Medidas magnéticas, eletromagnéticas e elétricas no ambiente natural do campo de testes da UFPA. 2007. 10th International Congress of The Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil.

LUIZ, J. G.; SILVA, L. M. C. **Geofísica de Prospeção**. 1995. Belém: CEJUP.

MACLEOD, I.N.; VIEIRA, S.; CHAVES, A.C. Analytic Signal and Reduction-to-the-Pole in the Interpretation of Total Magnetic Field Data at Low Magnetic Latitudes. 1993a. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 3. **Anais...** Rio de Janeiro. doi: <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.324.830>.

MACLEOD, I.N.; JONES, K.; DAI, T.F. 3-D Analytic Signal in the Interpretation of Total Magnetic Field Data at Low Magnetic Latitudes. 1993b. **Exploration Geophysics**, v.24, n.3-4, p.679–688. doi: <https://doi.org/10.1071/EG993679>.

NABIGHIAN, M.N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. 1972. **Geophysics**, v.37, n.3, p.507–517. doi: <http://dx.doi.org/10.1190/1.1440276>.

PORSANI, J.L. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano, meio ambiente e arqueologia: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. 2002. Projeto de pesquisa. Processo Fapesp nº 02/07509-1, São Paulo-SP.

PORSANI J.L., BORGES W.R., RODRIGUES S.I. & HIOGO F.Y. O Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG USP: Instalação e resultados GPR 2D-3D. 2006. Revista Brasileira de Geofísica, 24(1): 49-61.

PRINGLE J.K., JERVIS J.R., HANSEN J.D., JONES G.M., CASSIDY N.J. & CASSELLA J.P. Geophysical monitoring of simulated clandestine graves using electrical and ground penetrating radar methods: 0-3 years after burial. 2012. Journal of Forensic Science, 57: 1467-1486.

PRINGLE J.K., GIUBERTONI M., CASSIDY N.J., WISNIEWSKI K.D., HANSEN J.D., LINDFORD N.T. & DANIELS R.M. The use of magnetic susceptibility as a forensic search tool. 2015. *Forensic Science International*, 246: 31-42.

PYE K., CROFT D.J. Forensic Geoscience: introduction and overview. *Forensic Geoscience: Principles, Techniques and Applications*. 2004. Geological Society, London, Special Publications, 232 (215-236).

RODRIGUES, S.I. Caracterização GPR de tambores metálicos e plásticos: Estudo sobre o Sítio Controlado do IAG/USP. 2004. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas IAG/USP, São Paulo- SP.04-11. 102p.

RODRIGUES S.I., PORSANI J.L. Utilização do GPR para caracterizar tambores de plásticos enterrados no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP. 2006. *Brazilian Journal of Geophysics*, 24(2): 157-168.

ROEST, W.R.; VERHOEF, J.; PILKINGTON, M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. 1992. **Geophysics**, v.57, n.1, p.116–125. doi: <https://doi.org/10.1190/1.1443174>.

RUFFELL A., MCKINLEY J. Forensic geoscience: applications of geology, geomorphology and geophysics to criminal investigations. 2005. *Earth-Science Reviews* 69 235–247.

TELFORD, W.M.; GELDART, P.L.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics**. 1990. Cambridge: Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139167932>.

THÉBAULT, E., FINLAY, C.C., BEGGAN, C. D., ALKEN, P., AUBERT, J., BARROIS, O., ... & ZVEREVA, T. International geomagnetic reference field: the 12th generation. 2015. *Earth, Planets and Space*, 67(1), 1-19.

